

PRIMJENA NAVAL HYDRO PAKETA ZA DVOFAZNA STRUJANJA

Vukčević, V. & Jasak, H.

Sažetak: Ovaj rad prikazuje pregled primjene NavalHydro paketa u programu OpenFOAM za simulacije viskoznih, turbulentnih, dvofaznih strujanja sa slobodnom površinom. Za praćenje slobodne površine se koristi "Volume of Fluid" metoda, te se numerički proračuni vrše metodom kontrolnih volumena. Programski paket NavalHydro omogućava različite vrste simulacija vezane za brodsku hidrodinamiku, kao i za ostala područja gdje postoje dominantna strujanja sa slobodnom površinom. U ovom radu su ukratko prikazani primjeri otpora broda na mirnom moru, kao i gibanje broda kao krutog tijela na valovima. Također je prikazana simulacija kolapsa brane u kojoj vođeni val udara nepomičan, kruti stup.

Ključne riječi: Metoda kontrolnih volumena, Navier – Stokesove jednadžbe, dvofazna strujanja, OpenFOAM

1 UVOD

Brzi razvoj računalnih resursa u zadnjih 20 godina je omogućio primjenu računalne mehanike fluida (eng. Computational Fluid Dynamics, CFD) u brodograđevnoj industriji. Strujanja u brodskoj hidrodinamici su nestlačiva, viskozna, dvofazna, turbulentna i često nestacionarna. U programu OpenFOAM [1] je razvijen NavalHydro paket, te su njegove mogućnosti ukratko prikazane.

U sljedećem poglavlju prikazan je matematički model spomenutih strujanja. Treće poglavlje ukratko opisuje numeričku implementaciju metode kontrolnih volumena (eng. Finite Volume Method, FVM) i algoritam rješavanja sprege brzine i tlaka. U sljedećim poglavljima su prikazani rezultati simulacija: otpor broda na mirnom moru, gibanje broda kao krutog tijela na valovima, te kolaps brane u kojoj vođeni val udara nepomičan stup.

2 MATEMATIČKI MODEL

U ovom poglavlju je prikazan matematički model nestlačivog, dvofaznog strujanja s "Volume of Fluid" (VOF) metodom za praćenje slobodne površine.

2.1 Navier – Stokesove jednadžbe i jednadžba kontinuiteta

Dvofazno, nestlačivo i turbulentno strujanje se često modelira jednadžbom kontinuiteta (1) i Navier – Stokesovim jednadžbama (2) [2]:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu_{eff} + \sigma \kappa \nabla \alpha, \quad (2)$$

gdje su: \mathbf{U} brzina, p tlak, te ρ i μ_{eff} gustoća i dinamička viskoznost, redom. \mathbf{g} predstavlja gravitacijsku akceleraciju. σ i κ su redom koeficijent površinske napetosti i srednja zakrivljenost slobodne površine. α je indikatorska (VOF) funkcija koja će biti objašnjena u sljedećem poglavlju.

2.2 VOF jednadžba

Gornje jednadžbe bi se trebale riješiti za obje faze (vodu i zrak), zadovoljavajući rubne uvjete na slobodnoj površini. Da bi se izbjegla takva procedura, uvodi se dodatna VOF jednadžba pomoću koje je moguće fluid modelirati kao jedan kontinuum mješovitih svojstava. Polje gustoće i viskoznosti se mogu izraziti prema:

$$\rho = \alpha\rho_1 + (1 - \alpha)\rho_2, \quad (3)$$

$$\mu = \alpha\mu_1 + (1 - \alpha)\mu_2. \quad (4)$$

U gornjim jednadžbama indeks 1 predstavlja vodu, a indeks 2 zrak. α ima vrijednost 1 u vodi, te vrijednost 0 u zraku. Transportna jednadžba je sljedećeg oblika:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\alpha(1 - \alpha) \mathbf{U}^r) = 0. \quad (5)$$

Prva dva člana predstavljaju uobičajenu advekcijску jednadžbu, dok je zadnji član dodan da bi se zadržao oštar prijelaz između dvaju fluida [3].

2.3 Modeliranje turbulencije

Najčešće korišteni modeli turbulencije su modeli turbulentne viskoznosti [4] s dvije jednadžbe. Takvi modeli rješavaju dvije dodatne parcijalne diferencijalne transportne jednadžbe koje imaju naglašen lokalni karakter. Dodavanje takvih jednadžbi vodi do produljenja proračuna od svega 2 do 5%. $k - \omega$ SST [5] model je korišten u ovom radu. Nakon rješenja jednadžbi, turbulentna kinetička energija k i specifična disipacija ω su poznati, te služe za proračun μ_{eff} koji je potreban za jednadžbu (2).

3 NUMERIČKA IMPLEMENTACIJA

Metoda kontrolnih volumena (FVM) se koristi za diskretizaciju jednadžbi opisanih u prethodnom poglavlju. Koristeći standardne FVM procedure, postignuta je točnost drugog reda u prostoru. Brzina i tlak su spregnuti korištenjem PIMPLE algoritma koji je kombinacija SIMPLE i PISO algoritma. Korištenjem PIMPLE algoritma su omogućeni veliki Courantovi brojevi, odnosno veliki vremenski koraci. Sve jednadžbe, uključujući VOF jednadžbu se tretiraju implicitno, koristeći ograničene diskretizacijske sheme. Razvijene su dvije specijalizirane aplikacije: `steadyNavalFoam` za stacionarna strujanja, te `navalFoam` za nestacionarna strujanja. Stacionarna strujanja obuhvaćaju otpor broda na mirnom moru, gdje su tranzijentni efekti zanemareni.

Valovi se modeliraju relaksacijskim zonama [6]. Zone se postavljaju blizu ulaznoj i izlaznoj granici domene gdje se rješenje iz potencijalnog strujanja superponira s CFD rješenjem.

4 OTPOR BRODA NA MIRNOM MORU

Razvijeni programski paket je korišten za simulaciju otpora KRISO kontejnerskog broda (eng. KRISO Container Ship, KCS) [7]. Trup broda ima kormilo, bez ostalih privjesaka kao što je vidljivo na Sl. 1. Sve geometrijske i ostale karakteristike prikazane su u [7]. U proračunu je korištena simetralna ravnina koja omogućuje smanjenje proračunskog vremena. Brzina broda je 2.196 m/s, što odgovara Froudeovom broju od 0.26.

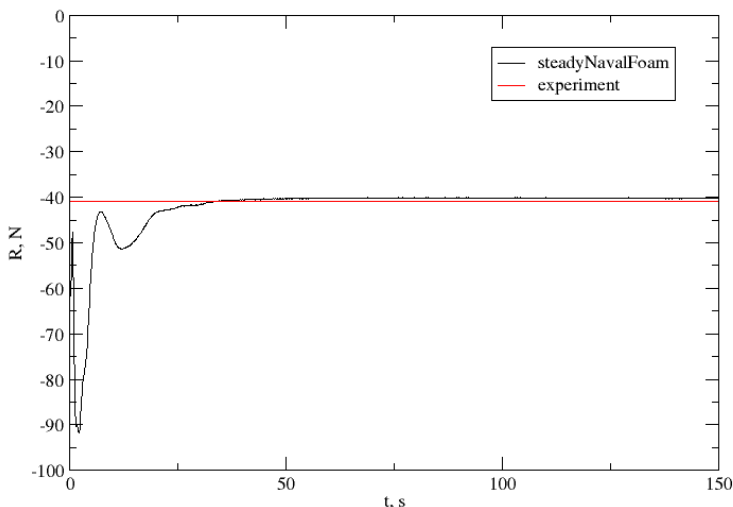


Sl. 1. Trup KCS broda, bočni pogled.

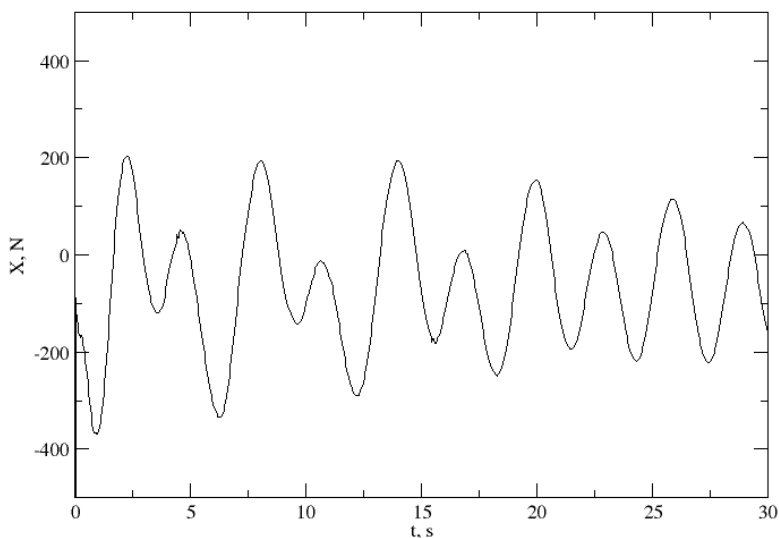
Proračunska mreža sadrži 950 000 kontrolnih volumena. Konvergencija sile otpora i usporedba s eksperimentalnim podacima je prikazana na Sl. 2. Relativna greška u ukupnoj sili otpora u odnosu na eksperiment je 1.9%. Trajanje simulacije je manje od 1 sat. Konvergencija je ostvarena nakon 75 s, dok je ugašena nakon 150 s.

5 SIMULACIJA KCS BRODA U POLJU VALOVA

KCS brod opisan u prethodnom poglavlju je korišten za simulaciju pomorstvenosti. Kako je model simetričan, dva stupnja slobode se računaju (poniranje i posrtanje), dok su ostali fiksirani. Brzina napredovanja broda je 2.196 m/s, period vala je 3 s, dok je valna visina 0.25 m. Za usporedbu, model je dugačak 7.28 m. Koriste se Stokesovi valovi drugog reda. Sila zalijetanja je prikazana na Sl. 3. Ovakve vrste simulacija daju neiscrpan raspon podataka: signale sila i momenata tijekom vremena, svih šest stupnjeva slobode, elevaciju slobodne površine, konture brzine, te volumna polja brzine, tlaka i varijabli turbulencije. Ostali numerički ili eksperimentalni podaci nisu dostupni za usporedbu.



Sl. 2. Konvergencija sile otpora i usporedba s eksperimentalnim podacima, $Fn = 0.26$.



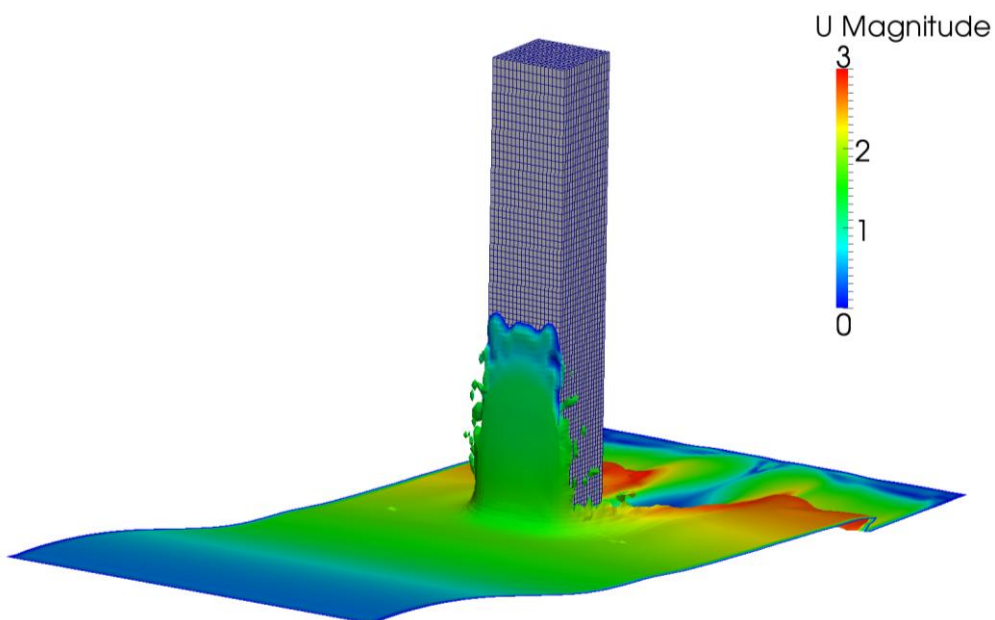
Sl. 3. Sila zalijetanja u vremenu.

6 UDAR VALA O NEPOMIČNI STUP

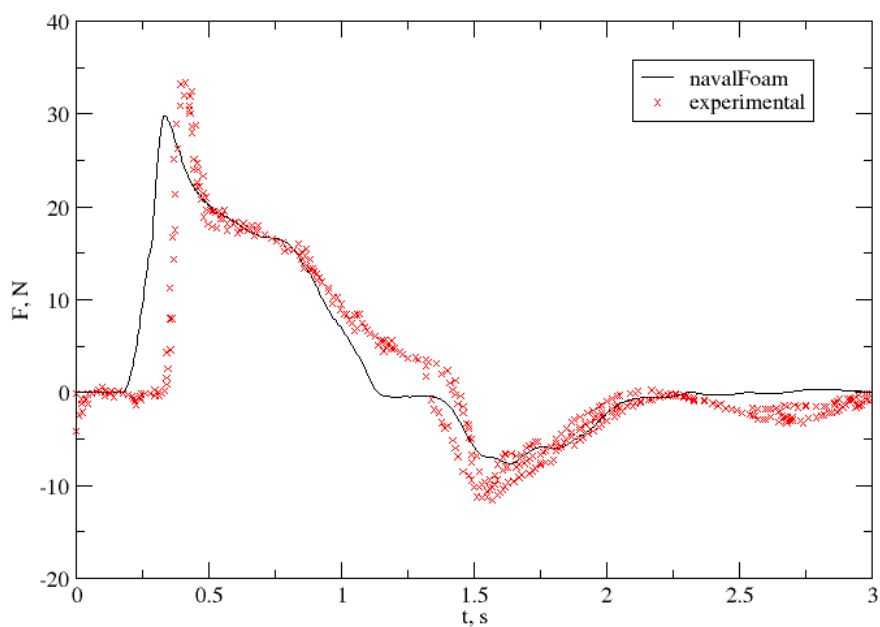
Konačno, prikazan je udar vala o nepomični stup kvadratnog poprečnog presjeka uslijed kolapsa brane (eng. "dam break"). Takva oštra geometrija predstavlja dodatne poteškoće pri numeričkim proračunima korištenjem VOF metode. Geometrija i eksperimentalni rezultati sile se mogu pronaći u [8]. Mreža korištena za proračun je blok strukturirana i ortogonalna, te sadrži približno milijun kontrolnih volumena. U eksperimentima je izmjerena sila u smjeru udara vala, te je uspoređena s numeričkim proračunom. U ovom proračunu se nisu koristili modeli turbulencije zbog dominantnog inercijskog efekta problema. Sl. 4. prikazuje izgled slobodne površine u trenutku neposredno nakon udara vode o stup. Usporedba numerički izračunate sile s eksperimentalnim podacima je prikazana na Sl. 5. Vršna proračunata sila je približno 8% manja od eksperimentalne. Povratni val se očituje u negativnoj sili, te je također dobro predviđen.

7 ZAKLJUČAK

U radu je ukratko prikazan programski paket *NavalHydro* za modeliranje dvofaznog, nestlačivog i turbulentnog strujanja. Validacija navedenog paketa je napravljena s tri različite vrste simulacija. Prilikom projektiranja novog broda, njegova sila otpora se mora moći pouzdano odrediti. Pokazano je dobro slaganje sile otpora s eksperimentalnim rezultatima. Takvi proračuni su brzi što omogućuje primjenu paketa u svrhu optimizacije forme trupa. Proračun broda na valovima pokazuje realno gibanje broda, iako rezultati nisu uspoređeni s rezultatima dobivenim drugim metodama zbog njihove nedostupnosti. Konačno, prikazan je udar brane o nepomični stup kvadratičnog presjeka. Sila pokazuje dobro poklapanje s eksperimentalnim rezultatima i u trenutku povratnog vala.



Sl. 4. Prikaz udara nailaznog vala o nepomični stup.



Sl. 5. Usporedba uzdužne sile s eksperimentalnim podacima.

Ovo kratko razmatranje dovodi do zaključka da je programski paket NavalHydro dovoljno zreo za savladavanje različitih problema u brodograđevnoj ili sličnim industrijama gdje postoje problemi vezani za dvofazna strujanja, te će biti predmet našeg daljnjeg rada.

Literatura:

- [1] Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H. "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object oriented techniques", Computers in Physics, No. 12., 1998, str. 620-631.
- [2] Ubbink, O., Issa, R. I., "A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes", Journal of Computational Physics, No. 153, 1999, str. 26-50.
- [3] Rusche, H., "Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fraction", Ph.D. thesis, Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, 2002.
- [4] Wilcox, D. C., "Turbulence Modeling for CFD", DCW Industries, Inc., La Canada, CA, 2006.
- [5] Menter, F. R., Kuntz, M., Langtry, R. "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model", Turbulence, Heat and Mass Transfer, No. 4., 2003, str. 625-632.
- [6] Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., Fredsøe, J. "A Wave Generation Toolbox for The Open – Source CFD library: OpenFOAM", International Journal for Numerical Methods in Fluids, No. 9., 2012, str. 1073-1088.
- [7] ..."Goththenburg 2010: A Workshop on CFD in ship Hydrodynamics", dostupno na <http://www.insean.cnr.it/sites/default/files/gothenburg2010/index.html>, 25. Ožujka, 2014.
- [8] Gómez – Gesteira, M., "SPHERIC SPH benchmark test cases: Test 1 – Force exerted by a schematic 3D dam break on a square cylinder", dostupno na http://cfd.mace.manchester.ac.uk/sph/TestCases/SPH_Test1.html, 15. Veljače 2014.

Autori:

Vuko Vukčević, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, tel. 01/6168-239, e-mail: vuko.vukcevic@fsb.hr

Hrvoje Jasak, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, tel. 01/6168-239, e-mail: hrvoje.jasak@fsb.hr